



DEUTSCHES
PATENTAMT

21 Aktenzeichen: P 37 02 203.2-52
22 Anmeldetag: 26. 1. 87
43 Offenlegungstag: 30. 7. 87
45 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 7. 4. 94

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

30 Unionspriorität: 32 33 31

27.01.86 JP P15368/86

73 Patentinhaber:

Agency of Industrial Science and Technology,
Tokio/Tokyo, JP

74 Vertreter:

Wagner, K., Dipl.-Ing.; Geyer, U., Dipl.-Phys.
Dr.rer.nat., Pat.-Anwälte, 80538 München

72 Erfinder:

Kanayama, Toshihiko, Ibaraki, JP; Itoh, Junji,
Ibaraki, JP

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht gezogene Druckschriften:

DE 35 04 194 A1
DE 33 16 144 A1
DE-OS 23 16 248
US 37 26 595
EP 01 46 244 A2

OHTSUKA, Y., TSUBOKAWA, M.: Dynamic
two-frequency interferometry for small
displacement measurements. In: OPTICS AND
LASER TECHNOLOGY, 1984, Nr. 2, S. 25-29;

54 Verfahren zum Messen von Relativbewegungen

DE 37 02 203 C 2

DE 37 02 203 C 2

Die Erfindung bezieht sich auf Verfahren zum Messen der Relativbewegung bzw. des Abstandes zweier Objekte.

Es sind bereits zahlreiche Verfahren zur Messung der Relativbewegung zweier Objekte bekannt. Insbesondere zeigt die EP-01 46 244 A2 bereits ein Verfahren zur Messung der Relativbewegung zweier Objekte. Bei diesem Verfahren trägt das eine Objekt ein Beugungsgitter, auf das zwei durch Strahlteilung eines Strahls einer Lichtquelle entstandene Lichtstrahlen auftreffen. Die auftretenden Beugungsordnungen werden vereinigt, und aus dem Interferenzsignal wird die gegenseitige Lage der Objekte ermittelt. Ein vergleichbarer Stand der Technik ist auch in der DE-33 16 144 A1 beschrieben. Ergänzend sei noch an Hand von Fig. 1 ein herkömmliches Verfahren zum Messen einer Relativverschiebung von wenigstens zwei Gegenständen zueinander durch Einsatz von Beugungsgittern beschrieben. Dieses herkömmliche Verfahren ist aus dem Aufsatz von Flanders et al. in Applied Physics Letters 31,426 (1977) bekannt. Beugungsgitter G1 und G2 mit jeweils denselben Gitterabständen bzw. derselben Gitterkonstante d sind auf zwei Objekten 1 bzw. 2 ausgebildet und liegen parallel zueinander, jedoch beabstandet voneinander. Wenn die Welle I senkrecht auf das Beugungsgitter G1 auffällt, wird es um einen Winkel Θ ($d \sin \Theta = n\lambda$, wobei n eine ganze Zahl ist, die die Beugungsordnung angibt) gebeugt, wobei dieser Winkel Θ von der Gitterkonstanten d und der Wellenlänge λ der Welle I abhängt. Die Intensität der gebeugten Wellen ändert sich in Abhängigkeit der relativen Lage zwischen den Beugungsgittern G1 und G2, so daß die Relativverschiebung zwischen den Objekten 1 und 2 oder zwischen den Beugungsgittern G1 und G2 durch Messen der Intensität der gebeugten Wellen ermittelt werden kann.

Da die Intensitäten der gebeugten Wellen $D+$ in der $+\Theta$ -Richtung und $D-$ in der $-\Theta$ -Richtung sich in entgegengesetzten Richtungen in Abhängigkeit der Relativverschiebung in der Richtung (X-Richtung) senkrecht zum Gitter in der Oberfläche ändern, wird es im Prinzip daher insbesondere möglich, die Relativverschiebung in der X-Richtung durch Messen der Intensitätsdifferenz zwischen zwei gebeugten Wellen $I(d+) - I(d-)$ zu ermitteln.

Das zuvor anhand von Fig. 1 beschriebene Verfahren weist jedoch Nachteile auf, so daß es wegen der nachfolgend beschriebenen Gründe in der Praxis nicht mit zufriedenstellendem Erfolg angewendet werden kann. Zunächst einmal bestehen die Wellen $D+$ und $D-$ aus vielen gebeugten Wellen, wie dies in Fig. 1 dargestellt ist. Die Welle, die in der i -ten Ordnung vom Beugungsgitter G1, in der j -ten-Ordnung vom Beugungsgitter G2 und danach in der k -ten-Ordnung vom Beugungsgitter G1 gebeugt wird, wird mit $D(i,j,k)$ bezeichnet, und die Welle, die reflektiert und in der i -ten Ordnung an der oberen Fläche des Beugungsgitters G1 gebeugt wird, wird mit $R(i)$ bezeichnet. Für die Beugung in der ersten Ordnung ist $D+$ dann eine gemischte Welle von gebeugten Wellen $R(1)$ und $D(i,j,k)$, (wobei $i+j+k = 1$), beispielsweise $D(0,0,1)$, $D(0,1,0)$, $D(1,0,0)$, $D(0,-1,2)$, $D(-1,0,2)$ usw. Der Einfachheit halber ist in Fig. 1 nur $R(1)$, $D(-1,1,1)$, $D(0,0,1)$, $D(1,-1,1)$ und $D(1,0,0)$ gezeigt. Die Abhängigkeit dieser gebeugten Wellen der Relativverschiebung in der X-Richtung der Gitter und von dem Abstand S zwischen den Beugungsgittern G1 und G2 ändert sich in Abhängigkeit von ihren Beugungsordnungen. Die Intensität von $D+$ und $D-$ sind daher komplizierte Funktionen der Relativverschiebung in der X-Richtung und dem Abstand S , so daß die Messung der Relativverschiebung in der X-Richtung durch Messen des Unterschieds zwischen $I(D+)$ und $I(D-)$ auf einen äußerst beschränkten Bereich des Abstands S begrenzt ist.

Wenn darüber hinaus Unterschiede in den Eigenschaften zwischen den Instrumenten zur Messung der Intensitäten von $D+$ und $D-$ vorhanden sind, enthält die gemessene Relativverschiebung Fehler. Um also die Meßgenauigkeit zu verbessern, müssen die Kennlinien und Eigenschaften der Instrumente zum Messen der Intensitäten von $D+$ und $D-$ in vollständige Übereinstimmung miteinander gebracht werden. Messungen mit hoher Genauigkeit werden daher schwierig.

Fig. 2 zeigt ein Meßverfahren, mit dem die Relativverschiebung ohne Abhängigkeit vom Abstand S gemessen werden kann. Dieses Verfahren wurde vom Erfinder der vorliegenden Erfindung vorgeschlagen und ist in der japanischen Patentanmeldung No. 60-1 65 231 beschrieben. Gemäß diesem Verfahren werden zwei Beugungsgitter G1 und G1' auf dem Objekt 1 ausgebildet. Diese beiden Beugungsgitter G1 und G1' sind voneinander um einen geeigneten Abstand beabstandet, so daß nur die gebeugten Wellen in den spezifischen Beugungsordnungen auf das Beugungsgitter G2 des Objekts 2 auffallen, so daß die starke Abhängigkeit der Intensität der vom Beugungsgitter G2 gebeugten Welle D vom Abstand S zwischen den Beugungsgittern G1 und G2 eliminiert ist. Die Relativverschiebung in der X-Richtung kann daher durch Messen der Intensität der gebeugten Welle bzw. des gebeugten Lichts D mit einem Detektor 3 ermittelt werden, ohne daß der Bereich des Abstands S beschränkt ist.

Das zuvor beschriebene Verfahren weist jedoch auch Nachteile auf, so daß es nicht mit zufriedenstellendem Erfolg in der Praxis angewendet werden kann. Zunächst einmal hängt die Intensität $I(D)$ der gebeugten Welle D von der Verschiebung x in der X-Richtung proportional von $\cos^2(2\pi x/d)$ (wobei d die Gitterkonstante von G1 ist) ab. Der Absolutwert von $I(D)$ wird jedoch durch verschiedene Faktoren beeinflusst, so daß es nicht möglich ist, diesen Wert theoretisch abzuschätzen. Um x aus der Intensität $I(D)$ zu ermitteln, muß die Änderung von $I(D)$ gemessen werden; während x in der Praxis im Bereich von etwa $d/4$ geändert wird. Ein weiterer Nachteil des zuvor beschriebenen Verfahrens besteht darin, daß das Meßergebnis sehr oft durch Änderungen der Meßeigenschaften des Meßinstrumentes nachteilig beeinflusst wird, da die Intensität der gebeugten Welle als eine Verschiebung repräsentierendes Signal (ein Verschiebungssignal) verwendet wird. Darüber hinaus ändert sich die Intensität der gebeugten Welle, die von den Beugungsgittern G1 und G1' auf das Beugungsgitter G2 auffällt, in Abhängigkeit einer Änderung von S , so daß das zuvor beschriebene Meßverfahren weiterhin den Nachteil aufweist, daß eine Änderung von S während des Meßvorgangs nicht zugelassen werden kann, wenn x mit hoher Genauigkeit gemessen werden soll.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Messen von Relativbewegungen anzugeben, bei dem mit hoher Genauigkeit gemessen werden kann.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß mit den im Anspruch 1 oder 2 oder 3 angegebenen Maßnahmen gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben.

Die vorliegende Erfindung beruht auf dem nachfolgend beschriebenen Grundprinzip. Die Phase der Welle, die durch das auf dem ersten Objekt ausgebildete Beugungsgitter gebeugt wird und dann vom zweiten Objekt reflektiert oder durch das auf dem zweiten Objekt ausgebildete Beugungsgitter gebeugt wird, sowie die Phase der Welle, die vom ersten Objekt reflektiert und dann vom auf dem zweiten Objekt ausgebildeten Beugungsgitter gebeugt wird, ändern sich in Abhängigkeit der Relativlage zwischen dem ersten und zweiten Objekt. Daraus ergibt sich, daß die Relativverschiebung zwischen den beiden Objekten durch Messen der Phase der gebeugten Wellen erhalten werden kann.

Die herkömmlichen Meßverfahren messen die Relativverschiebung zwischen zwei Objekten auf Grund der Tatsache, daß sich die Intensität der gebeugten Welle in Abhängigkeit zwischen der Relativverschiebung der beiden Objekte ändert. Die Intensität der gebeugten Welle ist jedoch sehr leicht nicht nur durch die zu messende Relativverschiebung beeinflussbar, sondern auch durch andere verschiedene Faktoren, beispielsweise die Art und der Zustand, unter der bzw. unter dem die beiden Beugungsgitter zueinander ausgerichtet oder zueinander angeordnet sind, der Winkel zwischen den beiden Beugungsgittern, der Winkel zwischen dem Detektor und dem Beugungsgitter, der Intensität der einfallenden Welle usw. Dagegen ist die Phase der gebeugten Welle eine Größe, die durch den Abstand des Laufwegs der Welle grundsätzlich festgelegt ist, so daß die Phase durch die zuvor beschriebenen Faktoren, die die Intensität der gebeugten Welle beeinflussen, kaum beeinflussbar ist. Gemäß der vorliegenden Erfindung kann die Relativverschiebung daher in zuverlässiger, stabiler Weise und hoher Genauigkeit gemessen werden, ohne daß äußere Störungen die Messung beeinflussen können. Aus denselben Gründen können die Bedingungen und Voraussetzungen für die Messungen weniger strikt gehandhabt werden und der Meßbereich kann vergrößert werden. Wenn die Frequenz kleiner als 10 GHz oder unterhalb des 10er-GHz-Bereichs liegt, ist es darüber hinaus leicht, die Phase der Welle mit einer Genauigkeit besser als 1° zu messen, so daß die Phasenmessung mit einer höheren Genauigkeit als die Intensitätsmessung durchgeführt werden kann.

Wenn für die Messung jedoch Schwingungen mit Frequenzen über 10 GHz bzw. über dem 10er-GHz-Bereich verwendet werden, wird es schwierig, die Phase mit hoher Genauigkeit zu messen. Um diese Schwierigkeit auszuräumen, ist eine Welle vorgesehen, deren Frequenz etwas anders als die für die Messung verwendete Welle ist, und die mit der letztgenannten Meßwelle interferieren kann, und diese beiden Wellen werden miteinander zur Interferenz gebracht, so daß die Phase der sich ergebenden Schwebung gemessen wird. Eine solche heterodyne bzw. Interferenzmessung, bei der die Schwebung zwischen zwei unterschiedliche Wellenlängen aufweisende Wellen verwendet wird, ist insbesondere sehr vorteilhaft für die Messung von Relativverschiebungen unter Verwendung von Beugungsgittern, weil das Schwebungssignal, ohne daß zusätzliche Komponententeile erforderlich sind, erhalten werden kann, wenn das Verfahren, bei dem zwei Wellen auf das Beugungsgitter auffallen gelassen werden, geeignet gewählt bzw. ausgebildet ist. Wenn das Meßinstrument in der zuvor beschriebenen Weise ausgebildet und aufgebaut ist, hängt die Phase des Schwebungssignals praktisch nicht vom Abstand zwischen dem Beugungsgitter und dem Detektor ab. Das Meßsystem kann daher sehr einfach eingestellt oder justiert werden, und die Störanfälligkeit bezüglich äußerer Störeinflüsse kann verringert werden.

Wenn zwei unterschiedliche Wellen für die Messung mit unterschiedlichen Frequenzen elektromagnetische Wellen sind, die in unterschiedlichen Richtungen polarisiert sind, kann das Verfahren, gemäß dem die Wellen auffallen, bzw. das Auffallverfahren durch Heranziehung der Tatsache wesentlich vereinfacht werden, daß die durch das Beugungsgitter erzielte Beugungswirkung und die Reflexion am Objekt in unterschiedlicher Weise von der Polarisationsrichtung der elektromagnetischen Welle abhängt. In diesem Falle ist es nicht nötig, die beiden elektromagnetischen Wellen voneinander zu trennen, sie können vielmehr als ein einziger Strahl fokussiert werden, so daß das für die Messung erforderliche Schwebungssignal erhalten werden kann. Ein intensives, kräftiges Schwebungssignal kann erzielt werden, wenn die Polarisation der auf den Detektor auffallenden Welle durch einen geeigneten Polarisator gesteuert wird. Bei diesem Verfahren laufen zwei für die Interferenzmessung verwendete Wellen auf genau demselben Strahlweg, so daß die Phase des Schwebungssignals praktisch unabhängig vom Abstand zwischen der Wellenquelle und dem Beugungsgitter sowie dem Abstand zwischen dem Beugungsgitter und dem Detektor ist. Die Einstellung und Justierung des Meßsystems kann daher wesentlich vereinfacht und erleichtert werden, und die Anfälligkeit gegen äußere Einflüsse kann wesentlich verringert werden, so daß eine hohe Zuverlässigkeit bei der Messung sichergestellt ist.

Die Erfindung wird nachstehend anhand der Zeichnungen beispielsweise näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 und 2 schematische Darstellungen zur Erläuterung von zwei herkömmlichen Verfahren,

Fig. 3A und 3B schematische Darstellungen einer ersten und einer zweiten Ausführungsform der Erfindung, und

Fig. 4–11 schematische Darstellungen weiterer erfindungsgemäßer Ausführungsformen.

Die Fig. 3A und 3B zeigen ein erstes bzw. zweites Ausführungsbeispiel, bei dem das erfindungsgemäße Verfahren auf das in Fig. 2 dargestellte Verfahren angewandt wird. Bei dem in Fig. 3A gezeigten Verfahren überlappen sich zwei Objekte 1 und 2 gegenseitig. Das Objekt 2 ist mit einem Beugungsgitter G2 ausgebildet, auf das eine Lichtwelle I senkrecht auffällt. Das Objekt 1 ist mit zwei Beugungsgittern G1 und G1' an den Stellen versehen, an denen die vom Beugungsgitter G2 gebeugten Wellen auftreffen. Die Beugungsgitter G1 und G1' weisen dieselbe Gitterkonstante bzw. denselben Spaltabstand d wie das Beugungsgitter G2 auf und sind zum Beugungsgitter G2 parallel angeordnet. Phasendetektoren 4 und 5 messen durch Detektieren der Wellen D und D' die Phasendifferenz Φ zwischen der Welle D einerseits, die durch das Beugungsgitter G2 und dann durch das Beugungsgitter G1 gebeugt wird und in genau entgegengesetzter Richtung zur senkrecht einfallenden Welle

(zum senkrecht einfallenden Licht) I läuft, und der Welle D' einerseits, die vom Beugungsgitter $G2$ und danach vom Beugungsgitter $G1'$ gebeugt wird und in entgegengesetzter Richtung zur Fortpflanzungsrichtung der Welle I läuft. Die Phasendifferenz ist vom Abstand S zwischen den Objekten 1 und 2 vollkommen unabhängig, jedoch proportional abhängig von der Relativverschiebung x zwischen den Objekten 1 und 2 in der Richtung (X -Richtung), die parallel zu den Oberflächen der Beugungsgitter $G1$, $G1'$ und $G2$ und senkrecht zur Richtung S verläuft. Die Phasendifferenz ist also $\Phi = 4\pi nx/d$ (Radian), wobei n die Beugungsordnung ist. Diese Beziehung ist im Hinblick darauf sehr einfach, daß die Intensitäten von D und D' vom Abstand S und der Relativverschiebung x abhängen.

Der Wert der Relativverschiebung x kann daher durch Messen der Phasendifferenz Φ unabhängig vom Abstand S ermittelt werden. Da der Proportionalkoeffizient n/d weiterhin auf einfache Weise mit hoher Genauigkeit bestimmt werden kann, ist es möglich, die Relativverschiebung x im stationären Zustand zu messen, ohne daß eine Verschiebung der Objekte in der X -Richtung hervorgerufen wird. Wenn die Wellenfrequenz kleiner als 10 GHz bzw. unterhalb des 10er GHz-Bereichs liegt, kann die Phasendifferenz zwischen den Wellen auf einfache Weise mit einer Auflösung kleiner als 1° bestimmt werden. Daher ist es möglich, daß die Relativverschiebung x mit einer Auflösung kleiner als $d/720$ gemessen werden kann, so daß die Meßgenauigkeit im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren zur Messung der Intensität der Welle wesentlich verbessert werden kann.

Bei dem in Fig. 3B dargestellten zweiten Ausführungsbeispiel ist im Gegensatz zu dem in Fig. 3A dargestellten Ausführungsbeispiel das Beugungsgitter $G2$ auf dem Objekt 1 ausgebildet und die Beugungsgitter $G1$ und $G1'$ sind auf dem Objekt 2 ausgebildet. Die Welle I wird auf das Beugungsgitter $G2$ auffallen gelassen und die Wellen D und D' vom Beugungsgitter $G1$ bzw. $G1'$ gelangen zum Detektor 4 bzw. 5, so daß die Messung der Relativverschiebung x in im wesentlichen derselben Weise wie dies zuvor beschrieben wurde, durchgeführt werden kann.

Wenn die für die Messung verwendete Welle eine Frequenz über 10 GHz aufweist bzw. über dem 10er-GHz-Bereich liegt, wird die direkte Messung der Phasendifferenz, wie dies zuvor anhand der Fig. 3A und 3B beschrieben wurde, schwierig. Daher sind, wie dies in Fig. 4 dargestellt ist, bei dieser Ausführungsform zwei Strahlungs- bzw. Wellenquellen 6 und 7 vorgesehen. Die Wellenquelle 7 erzeugt die Welle I_1 (mit einer Frequenz f_1), die auf das Beugungsgitter auffallengelassen wird, und die Wellenquelle 6 erzeugt die Welle I_2 , die eine Frequenz f_2 aufweist und mit der Welle I_1 interferieren kann. Die Wellen I_2 werden gleichzeitig mit den Wellen D und D' auf die Detektoren 4 und 5 auffallengelassen, so daß die Phasendifferenz zwischen der durch die Überlagerung der Welle D und der Welle I_2 erhaltene Interferenz und der durch die Überlagerung der Welle D' und der Welle I_2 erhaltene Interferenz detektiert wird. In diesem Falle erhält man die Phasendifferenz aus der Beziehung $\Phi = 4\pi n \cdot x/d$, wie auch bei den zuvor anhand der Fig. 3A und 3B beschriebenen Ausführungsformen. Wenn die Frequenz f_2 geeignet gewählt ist, kann die Frequenz $|f_1 - f_2|$ der Interferenz auf einen geeigneten Wert gesenkt werden, so daß der Wert der Relativverschiebung x mit hoher Genauigkeit gemessen werden kann. Dieses Verfahren ist insbesondere für die Messung einer extrem kleinen Verschiebung mit einer Genauigkeit in der Größenordnung von Nanometern durch Verwendung von Licht im sichtbaren Frequenzbereich besonders vorteilhaft.

Zur Erzeugung der Welle I_2 können die verschiedensten herkömmlichen Verfahren verwendet werden. Um die Wellen bis zu einer Frequenz in der 100er GHz-Größenordnung zu erzeugen, kann ein elektrischer Mischer verwendet werden. Wenn Licht benutzt wird, kann darüber hinaus das Licht, welches mit der Welle I_1 interferieren kann und eine andere Frequenz aufweist, mittels elektrooptischer und/oder akustooptischer Elemente, oszillierender Spiegel und/oder Lambdaviertel-Plättchen (quarterwave plates) erzeugt werden. Ein Zeeman-Laser, in dem ein Lasermedium einem Magnetfeld ausgesetzt ist, erzeugt gleichzeitig zwei Strahlkomponenten, die sich voneinander hinsichtlich der Polarisation und Frequenz unterscheiden, jedoch miteinander interferieren können, so daß ein solcher Zeeman-Laser sehr vorteilhaft im Zusammenhang mit der in Fig. 4 dargestellten Methode eingesetzt werden kann.

Fig. 5 zeigt einen einfachen Aufbau des anhand von Fig. 4 beschriebenen Ausführungsbeispiels, wenn Lichtstrahlen, die miteinander interferieren können, unterschiedliche Frequenz aufweisen und in zueinander senkrechten Richtungen linearpolarisiert sind, in einem einzigen Lichtstrom bzw. Lichtstrahl (wie dies bei einem lateralen Zeeman-Laser der Fall ist) erhalten werden. In Fig. 5 wird der Lichtstrahl I_1 mit einer Frequenz f_1 durch einen polarisierten Strahlenteiler 8 hindurchgelassen und gelangt über eine Lamptaviertel-Platte 9 auf das Beugungsgitter $G2$. Der Lichtstrahl I_2 mit einer Frequenz f_2 wird dagegen vom polarisierten Strahlenteiler 8 reflektiert, durchläuft eine Lamptavierte-Platte 10 und fällt auf einen flachen Spiegel 11 auf. Die vom Beugungsgitter $G2$ gebeugten Wellen D und D' werden vom polarisierten Strahlenteiler 8 reflektiert und fallen zusammen mit dem vom flachen Spiegel 11 zurückreflektierten Licht I_2 auf die Detektoren 4 und 5 auf. Die Justierung des optischen Systems gemäß dem in Fig. 5 dargestellten dritten Ausführungsbeispiel ist einfacher als bei dem in Fig. 4 dargestellten zweiten Ausführungsbeispiel.

Bei dem in Fig. 6 dargestellten Ausführungsbeispiel ist die Anordnung der Beugungsgitter $G1$, $G1'$ und $G2$ im wesentlichen dieselbe wie bei dem in Fig. 2 dargestellten Ausführungsbeispiel. Die Welle I_1 mit einer Frequenz f_1 wird auf das Beugungsgitter $G2$ und die Welle I_2 mit einer Frequenz f_2 wird auf die Beugungsgitter $G1$ und $G1'$ auffallengelassen. Es ist nicht erforderlich, daß die Beugungsgitter $G1$, $G1'$ und $G2$ dieselbe Gitterkonstante aufweisen, es reicht vielmehr aus, daß der vom Beugungsgitter $G2$ (Gitterkonstante d_2) gebeugte Lichtstrahl I_1 Komponenten enthält, deren Richtungen mit den Richtungen des gebeugten Lichtstrahls I_2 übereinstimmen, der von den Beugungsgitter $G1$ und $G1'$ (Gitterkonstanten d_1 bzw. d_1') gebeugt werden. Das heißt, es reicht aus, den Beziehungen $d_1/d_2 = m/n$ und $d_1'/d_2 = l/n$ (wobei l , m und n ganze Zahlen sind) zu genügen. Die Beugungen mit niedrigen Beugungsordnungen haben jedoch eine höhere Beugungswirkung, so daß es vorteilhaft ist, $d_1 = d_2 = d_1'$ in der Praxis zu setzen.

Wenn die gebeugten Lichtstrahlen D und D' gebeugte Wellen sind, in denen der gebeugte Lichtstrahl I_1 und

die vom Beugungsgitter G1 bzw. G1' gebeugten Lichtstrahlen I₂ sich einander überlagern, erzeugen die Intensitäten der gebeugten Lichtstrahlen D und D' die Interferenz bzw. Schwebung mit einer Frequenz |f₁ - f₂|. Bei diesem Ausführungsbeispiel werden die gebeugten Lichtstrahlen D und D' also durch den Detektor 4 bzw. 5 detektiert, so daß die Phasendifferenz die zwischen den Interferenzen bzw. Schwebungen der gebeugten Lichtstrahlen D und D' detektiert wird. Die Phasendifferenz Φ und die Relativverschiebung x in X-Richtung weist die folgende Beziehung auf:

$$\Phi = 4\pi nx/d_2,$$

so daß die Relativverschiebung x mit einer hohen Genauigkeit durch Messen der Phasendifferenz Φ unabhängig vom Abstand S zwischen den Beugungsgittern G1 und G1' und dem Beugungsgitter G2 gemessen werden kann.

Die in Fig. 6 dargestellte Ausführungsform weist das Merkmal auf, daß dann, wenn |f₁ - f₂| wesentlich kleiner als f₁ oder f₂ gewählt wird, die Phasendifferenz Φ völlig unabhängig von Abstandsänderungen zwischen dem Beugungsgitter G1 und dem Detektor 4 und zwischen dem Beugungsgitter G1' und dem Detektor 5 wird. Wenn die Differenz zwischen dem Abstand zwischen dem Beugungsgitter G1 und dem Detektor 4 und dem Abstand zwischen dem Beugungsgitter G1' und dem Detektor 5 mit ΔL bezeichnet wird, wird die durch ΔL hervorgerufene Phasendifferenz $2\pi\Delta L |f_1 - f_2|/c$ (wobei c die Wellengeschwindigkeit ist), so daß es leicht ist, den Wert vernachlässigbar klein zu machen, wenn |f₁ - f₂| geeignet gewählt ist. Die Einstellung oder Justierung des Meßsystems bei diesem Verfahren kann daher im Vergleich zu den Ausführungsbeispielen 1 bis 3 wesentlich vereinfacht werden und darüber hinaus ist dieses Verfahren praktisch immun gegen äußere Störungen.

Wenn der Lichtstrahl I₂ über die gesamte Oberfläche in Fig. 6 hinweg einschließlich des Beugungsgitters G2 gleichförmig auffällt, kann die Relativverschiebung x in der X-Richtung in im wesentlichen derselben Weise gemessen werden, wie dies zuvor beschrieben wurde. Die Phasendifferenz Φ ist jedoch nur dann der Relativverschiebung x proportional, wenn x wesentlich kleiner als d₂ ist. Da das Beleuchtungs- oder Projektionssystem jedoch einen einfachen Aufbau aufweisen kann, ist das zuvor beschriebene Verfahren jedoch zum Zwecke der Detektion x = 0 vorteilhafter als im Falle der Registration oder Ausrichtung zwischen den Objekten 1 und 2. Um ein solches Beleuchtungs- oder Lichtprojektionssystem aufzubauen, wenn beispielsweise die linearpolarisierten Lichtstrahlen I₁ und I₂ in unterschiedlicher Richtung polarisiert sind, wird ein optisch anisotropes Material in ein Lichtstrahl-Fokussierungssystem eingesetzt, so daß zwischen den Lichtstrahlen I₁ und I₂ ein Unterschied in der optischen Weglänge entsteht, so daß nur der Lichtstrahl I₁ auf dem Beugungsgitter G2 fokussiert wird. Wenn die Lichtstrahlen I₁ und I₂ wie im zuvor beschriebenen Falle in unterschiedlichen Richtungen polarisierte elektromagnetische Wellen sind, ergibt sich derselbe Effekt wie bei der Ausführungsform, wenn nur die Beugungsgitter G1 und G1' beleuchtet werden, auch dann, wenn der Lichtstrahl I₂ gleichförmig über die gesamte Fläche einschließlich des Beugungsgitters G2 auffällt. Zu diesem Zwecke werden eine Lamptaviertel-Platte und ein Polarisator vor jedem Detektor 4 und 5 angeordnet, so daß die Lichtstrahlen I₂ eliminiert werden und nicht auf die Detektoren 4 und 5 auftreffen. Der Polarisationszustand der gebeugten Welle ändert sich in Abhängigkeit vom Polarisationszustand der einfallenden Welle und des Beugungswegs, so daß nur eine bestimmte gebeugte Komponente in der zuvor beschriebenen Weise eliminiert werden kann.

Bei dem in Fig. 7 dargestellten Ausführungsbeispiel sind die dieselbe Gitterkonstante d₁ aufweisenden Beugungsgitter G1 und G1' auf dem Objekt 1 vorgesehen, und die Welle I₁ mit einer Frequenz f₁ fällt auf das Beugungsgitter G1 auf, wogegen die Welle I₁ mit der Frequenz f₁ auf das Beugungsgitter G1' auffällt. Das Beugungsgitter G2 ist parallel zu dem Beugungsgitter G1 und G1' an einer Stelle angeordnet, an der die gebeugten Lichtstrahlen I₁ und I₂ in derselben Beugungsordnung von den Beugungsgittern G1 bzw. G2 auffallen. Die Gitterkonstante d₂ des Beugungsgitters G2 ist so gewählt, daß d₂ = d₁ oder d₂ = 1,5 d₁ ist, wobei die Welle, die zuerst vom Beugungsgitter G1 und dann vom Beugungsgitter G2 gebeugt wird, sowie die Welle, die zuerst vom Beugungsgitter G1' und dann vom Beugungsgitter G2 gebeugt wird, sich in derselben Richtung fortpflanzen. Aus diesem Grunde ist es vorteilhaft, d₂/d₁ = j/2i zu wählen, wobei i und j positive ganze Zahlen sind. Wenn d₂ = 1,5 d₁ ist, werden die Welle, die vom Beugungsgitter G1 in der ersten Ordnung und dann vom Beugungsgitter G2 in der minus ersten Ordnung gebeugt werden, sowie die Welle, die vom Beugungsgitter G1' in der minus ersten Ordnung und dann vom Beugungsgitter G2 in der zweiten Ordnung gebeugt werden, die Wellen, die sich in derselben Richtung fortpflanzen. Wenn d₂ jedoch ein ganzzahliges Vielfaches von d₁ ist, wird die vom Beugungsgitter G1 gebeugte Welle am Beugungsgitter G2 gebeugt und dann wieder zum Beugungsgitter G1 zurückgeworfen, so daß die gegenseitige Abhängigkeit der relativen Verschiebung, die durch die Messung erhalten wird, kompliziert wird. Daher ist es vorteilhaft, daß d₂ kein ganzzahliges Vielfaches von d₁ ist.

Bei dieser in Fig. 7 dargestellten Ausführungsform erzeugen wenigstens drei gebeugte Wellen D₁, D₂ und D₃ eine Interferenz bzw. Schwebung mit einer Frequenz |f₁ - f₂|, und die Phasendifferenz zwischen den Interferenzen bzw. Schwebungen ist gegeben durch

$$\Phi(D_2) - \Phi(D_1) = 1/2 \{ \Phi(D_3) - \Phi(D_1) \} + \frac{4\pi nx}{d_1}$$

wobei $\Phi(D_i)$ die Phase der Interferenz bzw. Schwebung von D_i; n die Beugungsordnung an den Beugungsgitter G1 und G1' und x die Relativverschiebung in der X-Richtung ist. Der Wert für die Relativverschiebung x kann daher durch Messen von $\Phi(D_2) - \Phi(D_1)$ und $\Phi(D_3) - \Phi(D_1)$ durch die Detektoren 3 und 5 erhalten werden. In diesem Falle detektieren die Detektoren 3, 4 und 5 die gebeugten Wellen D₁, D₂ bzw. D₃.

Bei dem Ausführungsbeispiel 5 ist der Aufbau des Beleuchtungs- oder Projektionssystems einfacher als der des Ausführungsbeispiels 4. Es sei insbesondere darauf hingewiesen, daß dann, wenn die Lichtstrahlen I₁ und I₂ in

unterschiedlichen Richtungen linear polarisierte Lichtstrahlen sind, der für das in Fig. 7 dargestellte Ausführungsbeispiel 5 erforderliche doppelte Lichtstrom nur dadurch erreicht werden kann, daß die Lichtstrahlen durch eine geeignete doppelte Refraktionsplatte hindurchgeleitet werden.

Wenn die beiden Wellen I_1 und I_2 (mit einer Frequenz f_1 bzw. f_2), die bei der Messung benutzt werden, in unterschiedlichen Richtungen polarisierte elektromagnetische Wellen sind, kann das Beleuchtungs- oder Lichtprojektionssystem, das für die Messung der relativen Verschiebung erforderlich ist, durch Ausnutzung der Tatsache konstruktionsmäßig sehr einfach gehalten werden, daß die Beugungswirkung eines Beugungsgitters vom Polarisationszustand des Lichts abhängt. Ein Beispiel eines solchen Systems ist in Fig. 8 dargestellt. Der Aufbau und die Anordnung der Beugungsgitter G_1 , G_1' und G_2 sind im wesentlichen denen, wie sie in Fig. 7 dargestellt sind, gleich. Die Gitterkonstante d_2 des Beugungsgitters G_2 ist kein ganzzahliges Vielfaches von d_1 und beispielsweise $1,5 d_1$. Wenn die elektromagnetischen Wellen I_1 und I_2 , die unterschiedliche Polarisation und Frequenz aufweisen, kombiniert werden, und eine kombinierte Welle I bilden, die dann auf das Meßsystem auffällt, erhält man die kombinierte Welle Da durch Kombination der Welle, die in der minus ersten Ordnung durch das Beugungsgitter G_1 und dann in der zweiten Ordnung durch das Beugungsgitter G_2 gebeugt wird, mit der Welle, die in der ersten Ordnung durch das Beugungsgitter G_1' und dann in der minus ersten Ordnung des Beugungsgitters G_2 gebeugt wird. Die kombinierte Welle Db erhält man durch Beugung in den Ordnungen mit in Bezug zur kombinierten Welle Da entgegengesetztem Vorzeichen. Die auf diese Weise erhaltenen kombinierten Wellen Da und Db durchlaufen vor Auftreffen auf die Detektoren 4 bzw. 5 Polarisatoren 21 bzw. 22, die die Lichtstrahlen in geeignete Richtungen polarisieren. Als nächste wird die Phasendifferenz zwischen den Schwebungen in den kombinierten Wellen Da und Db gemessen, so daß die Relativverschiebung in der x-Richtung zwischen den Objekten 1 und 2 gemessen wird. Zwischen den Beugungsgittern G_1 und G_1' ist kein Beugungsgitter vorhanden, so daß die Hauptkomponenten der vom Beugungsgitter G_2 gebeugten Welle I nicht auf die Beugungsgitter G_1 und G_1' fällt. Das in Fig. 8 dargestellte Ausführungsbeispiel kann so abgewandelt werden, daß die Beugungsgitter G_1 und G_1' auf dem Objekt 2 und das Beugungsgitter G_2 auf dem Objekt 1 ausgebildet ist, so daß der Lichtstrahl I zuerst auf das Beugungsgitter G_2 auffällt.

Nachfolgend soll der Grund, weshalb der Wert x durch das zuvor beschriebene Verfahren ermittelt werden kann, erläutert werden. Wenn der komplexe Amplitudenbeugungsgrad des Lichtstrahls I_1 an $G_1' \rightarrow Da$ und der Beugungsgrad an $G_1' \rightarrow Da$ des Lichtstrahls I_1 , die in der durch den Polarisator 21 festgelegten Richtung gemessen werden, mit γ_1 bzw. $\gamma_{1\alpha}$ und die Amplitudenbeugungsgrade des Lichtstrahls I_2 , der in derselben zuvor beschriebenen Weise gemessen wird, mit γ_2 bzw. $\gamma_{2\beta}$ bezeichnet werden, ist die Amplitude $A(Da)$ von Da durch die Gleichung

$$A(Da) = \gamma_1(e^{-i\delta} + \alpha e^{i\delta})A_1 + \gamma_2(e^{-i\delta} + \beta e^{i\delta})A_2$$

gegeben, wobei A_1 und A_2 die Amplituden von I_1 bzw. I_2 an den Beugungsgittern G_1 und G_1' und $\delta = 2\pi x/d_1$ ist. Allgemein ändert sich der Beugungsgrad in Abhängigkeit von dem Polarisationszustand, so daß $\alpha \neq \beta$ ist, mit Ausnahme allerdings des Falles eines hohen Grads an Symmetrie, beispielsweise wenn sowohl I_1 als auch I_2 zirkular polarisiertes Licht ist. Die Amplitude von Db ist gleich einem Wert, der erhalten wird, wenn $\delta \rightarrow -\delta$ in $A(Da)$. Daher ergibt sich, daß die Phasen der Schwebungen von Da und Db sich in Abhängigkeit des Wertes δ ändern, und die Phasendifferenz ist gegeben durch:

$$\Phi(Db) - \Phi(Da) = 2 \arctan \frac{(\alpha - \beta) \sin 2\delta}{1 + \alpha\beta + (\alpha + \beta) \cos 2\delta}$$

und der Wert x kann mit dieser Maßnahme bestimmt werden.

Im praktischen Falle ist es höchst vorteilhaft, wenn die Polarisationsrichtungen von I_1 und I_2 aufeinander senkrecht stehen. In diesem Falle liegt die Polarisationsrichtung von I_1 in der Richtung des Beugungsgitters, während I_1 in Richtung senkrecht zur Polarisationsrichtung von I_2 polarisiert ist. Dann wird die Phasendifferenz $\Phi(Db) - \Phi(Da)$ von den Richtungen der Polarisatoren 21 und 22, die vor den Detektoren 4 und 5 angeordnet sind, unabhängig. Es ist weiterhin leicht, die Richtung auszuwählen, in der die höchste Meßgenauigkeit erreicht wird, und zwar durch Drehen der Polarisationsrichtungen von I_1 und I_2 .

Der Wert x kann mit hoher Genauigkeit unabhängig vom Abstand S zwischen den Objekten 1 und 2 mittels des in Fig. 8 dargestellten Verfahrens ermittelt werden. Gemäß diesem Verfahren ist das Beleuchtungs- oder Lichtprojektionssystem einfach aufgebaut, so daß die Justierung und Einstellung sehr vereinfacht werden kann. Infolgedessen werden die Messungen nicht nachteilig durch äußere Störungen beeinträchtigt, und es kann eine hohe Stabilität sichergestellt werden. Darüber hinaus ist dieses Verfahren dadurch vorteilhaft, daß die Justierungen und Einstellungen, die für die Messung erforderlich sind, durch die Messungen der Phasen der Schwebungen der gebeugten Wellen D und D' vorgenommen werden können. Die Phasen der Schwebungen von D und D' sind vom Wert x unabhängig, ändert sich jedoch in Abhängigkeit davon, ob und wie weit die Beugungsgitter G_1 und G_1' einerseits und das Beugungsgitter G_2 andererseits parallel sind, sowie in Abhängigkeit davon, ob und wie weit I senkrecht auf die Oberfläche des Beugungsgitters fällt. Daraus ergibt sich also, daß dann, wenn die Beugungsgitter G_1 und G_1' einerseits und das Beugungsgitter G_2 andererseits parallel zueinander und die Einfallsrichtung von I so eingestellt werden, daß die Phasendifferenz minimiert wird, die für die Messung von x erforderlichen Justierungen auf diese Weise vorgenommen werden können. Diese Justierungen sind höchst wirksam, um die Meßgenauigkeit zu verbessern.

Die Tatsache, daß die Messung in der Praxis mit hoher Genauigkeit durchgeführt werden kann, wird anhand des folgenden Beispiels deutlich. Dünne Au-Schichten oder Filme werden auf einem Gitter auf dem aus SiO_2

bestehenden Objekt 1 gebildet, so daß die Beugungsgitter G1 und G1' entstehen und es werden Nuten mit einer Breite von 0,4 µm durch die Oberfläche des aus Si bestehenden Objekts 2 geschnitten, so daß sich auf diese Weise das Beugungsgitter G2 ergibt. Die Gitterkonstante der Beugungsgitter G1 und G1' ist 0,8 µm und die Beugungsgitter G1 und G1' sind voneinander um 75 µm beabstandet. Die Gitterkonstante des Beugungsgitters G2 ist 1,2 µm. Der Laserstrahl mit einer Wellenlänge von 632,8 nm wird von einem He-Ne-Transversal-Zeeman-Laser in der Weise emittiert, daß der Laserstrahl senkrecht auf die Beugungsgitter auffällt. Die Schwebungsfrequenz ist etwa 300 KHz. Die Polarisationsrichtung eines der beiden linearpolarisierten Lichtstrahlen ist so gewählt, daß sie mit der Richtung des Beugungsgitters übereinstimmt, und der Polarisator wird vor dem Detektor in einer Richtung von 45° bezüglich der Richtung des Beugungsgitters angeordnet. Auf diese Weise werden die Werte α und β etwa gleich 0,5 bzw. 0,6, so daß die Phasendifferenz zwischen den Schwebungen von D+ und D- mit einer Genauigkeit gemessen werden kann, die höher als 1° ist. Das bedeutet, daß der Wert x in der Größenordnung von 0,01 µm genau ermittelt werden kann. Diese Eigenschaft oder Wirkung kann unabhängig von Änderungen im Abstand zwischen den Objekten 1 und 2 in einem Bereich von 20 µm bis 70 µm erreicht werden.

Fig. 9 zeigt die Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens auf das in Fig. 1 dargestellte herkömmliche System. Wenn angenommen wird, daß D+ und D- vom Beugungsgitter G2 nur in der ersten Ordnung gebeugt werden, und wenn die Amplitude der auffallenden Welle mit A₀ bezeichnet wird, so sind die Amplituden A+ und A- von D+ und D- gegeben durch

$$A+ = \gamma(1 + \alpha e^{-i\delta} + \beta e^{i\delta})A_0$$

und

$$A- = \gamma(1 + \alpha e^{i\delta} + \beta e^{-i\delta})A_0,$$

wobei γ, α und β die komplexen Amplitudenbeugungsgrade eines Doppelbeugungsgitters sind, und ihre Phasen sind komplizierte Funktionen des Abstands S zwischen den Beugungsgittern G1 und G2. Darüber hinaus gilt δ = (2πx)/d, wobei d die Gitterkonstante ist. Auf diese Weise ergibt sich die Differenz der Intensität zwischen zwei gebeugten Wellen zu:

$$I(D+) - I(D-) = 4 |\gamma|^2 \text{Im}\{(\alpha - \beta) \sin \delta + \alpha \beta \sin 2\delta\} |A_0|^2,$$

wobei Im einen Imaginärwert darstellt. Daraus folgt, daß die Abhängigkeit von I(D+) - I(D-) von δ oder x durch den Wert der Imaginärteile α und β bestimmt wird. Die Imaginärteile von α und β ändern sich jedoch stark in Abhängigkeit des Abstands D zwischen den Objekten 1 und 2, so daß das herkömmliche, in Fig. 1 dargestellte Verfahren stark von Änderungen des Abstands S beeinflusst wird.

Wenn dagegen das erfindungsgemäße Verfahren bei dem in Fig. 9 dargestellten System angewandt wird, können die Eigenschaften wegen der zuvor beschriebenen Gründe wesentlich verbessert werden. Wenn die auffallende Welle I die Summe zweier elektromagnetischer Wellen I₁ und I₂ ist, deren Frequenz und Polarisationszustand unterschiedlich sind, ergeben die Intensitäten von D+ und D- Schwebungen. Wenn dabei Polarisatoren 21 und 22 vor die Detektoren 4 bzw. 5 angeordnet werden, können die höheren Schwebungsintensitäten erhalten werden.

Wenn die komplexen Amplitudenbeugungsgrade von I₁ und I₂ mit γ₁, α₁ und β₁ bzw. γ₂, α₂ und β₂ bezeichnet werden, wird die Phasendifferenz zwischen den Schwebungen in D+ und D- fast proportional zu α₁ - α₂* + β₁ - β₂*, wenn δ ausreichend kleiner als 1 ist. Im Vergleich zu den Imaginärteilen von α und β ist die Abhängigkeit dieses Wertes von Abstand S recht klein. Daraus ergibt sich, daß die Messung von x über einen weiten Bereich des Abstands S durch Messung der Phasendifferenz zwischen den Schwebungskomponenten von D+ und D- durchgeführt werden kann. Im Vergleich zur Intensitätsmessung ist die Phasenmessung darüber hinaus weniger durch Änderungen externer Faktoren beeinflussbar, so daß eine hohe Meßgenauigkeit sichergestellt werden kann.

Im praktischen Falle ergeben sich mit dem erfindungsgemäßen Verfahren die nachfolgenden bemerkenswerten Eigenschaftsverbesserungen. Eine dünne Au-Schicht bzw. ein dünner Au-Film wird in Form eines Gitters auf dem aus SiO₂ bestehenden Objekt 1 ausgebildet, so daß sich das Beugungsgitter G1 ergibt, während Nuten in einer Breite von 0,4 µm in die Oberfläche des aus Si bestehenden Objekts 2 geschnitten wird, so daß dadurch das Beugungsgitter G2 entsteht. Die Gitterkonstanten beider Beugungsgitter G1 und G2 ist 1 µm. Wie beim Ausführungsbeispiel 6 ist die auffallende Welle I der von einem He-Ne-Transversal-Zeeman-Laser abgegebene Laserstrahl, und die Richtstrahlkomponenten werden in die Richtung des Beugungsgitters und senkrecht zu dieser Richtung polarisiert. Um die relative Verschiebung in der X-Richtung mit der herkömmlichen, in Fig. 1 dargestellten Methode zu messen, muß der Abstand S zwischen den Beugungsgittern G1 und G2 auf einen bestimmten Wert (beispielsweise 22,23 µm) festgelegt bzw. bestimmt werden, der seinerseits durch die Wellenlänge des auffallenden Lichts I und die Gitterkonstante der Beugungsgitter G1 und G2 festgelegt ist, wobei eine Fehlertoleranz von weniger als 10 nm eingehalten werden muß. Daher hat es sich als praktisch unmöglich herausgestellt, dieses herkömmliche Verfahren einzusetzen. Mit dem erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiel 7 wird die Begrenzung des Abstands S im wesentlichen ausgeschaltet und es wird möglich, die relative Verschiebung in der X-Richtung mit einer Genauigkeit zu messen, die über einen weiten Bereich des Abstands S zwischen 10 bis 100 µm mit Ausnahme einiger bestimmter Werte höher als 0,05 µm ist. Die Ausnahme besteht lediglich in einer Genauigkeit von ±0,1 µm in der Nähe eines Wertes S (Φ = 39° ist ein Beugungswinkel), bei der S(cos Θ - 1) ein ganzzahliges Vielfaches einer halben Wellenlänge ist.

Fig. 10 zeigt die Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens bei der Messung der relativen Verschiebung in einer Richtung senkrecht zur Oberfläche des Beugungsgitters. Wie in Fig. 10 dargestellt ist, ist ein Objekt 1 von zwei parallel zueinander angeordneten Objekten mit dem Beugungsgitter G ausgerüstet und die elektromagnetische Welle I fällt senkrecht auf die Oberfläche des Beugungsgitters G ein. Hierbei ist die gebeugte Welle D die Kombination der an der oberen Oberfläche des Beugungsgitters G beugungsreflektierten Welle, der von Beugungsgitter G gebeugten und dann am Objekt 2 reflektierten Welle, sowie der am Objekt 2 reflektierten und dann am Beugungsgitter G gebeugten Welle.

Bei den herkömmlichen Verfahren wird die Intensität D gemessen und dadurch der Abstand S zwischen dem Objekt 1 und dem Objekt 2 ermittelt, so daß es zur Spezifizierung des Abstands S auf einen vorgegebenen Wert erforderlich ist, S und damit auch die Intensität D zu ändern. Darüber hinaus kann die Messung leicht durch Änderungen der Intensität der einfallenden Welle beeinflusst werden, so daß die Meßgenauigkeit auf $\lambda/20$ begrenzt ist, wobei λ die Wellenlänge von I ist.

Die Meßgenauigkeit kann auf einfache Weise durch Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens auf das in Fig. 10 dargestellte Ausführungsbeispiel verbessert werden. Dabei ist die einfallende Welle I eine elektromagnetische Welle mit zwei Komponenten I_1 und I_2 , die unterschiedliche Frequenz und Polarisationszustände aufweisen. Das heißt, $I = I_1 + I_2$. Die gebeugte Welle D wird vom Detektor 4 detektiert, so daß die Phase der Schwebungskomponenten gemessen werden kann. Wenn der Polarisator 21 vor dem Detektor 4 angeordnet und in irgendeiner geeigneten Richtung ausgerichtet ist, ist es möglich, eine hohe, starke Schwebung zu erreichen.

Der Grund, weshalb der Abstand S in der zuvor beschriebenen Weise gemessen wird, wird nachfolgend erläutert. D ist eine kombinierte gebeugte Welle, bestehend aus $D(0,1)$, $D(1,0)$, $D(-1,2)$ usw., wobei jeweils unterschiedliche optische Wege vorhanden sind. Die Beugungskomponenten sind jeweils unterschiedlich abhängig von den Amplitudenbeugungsgraden bezüglich des Polarisationszustands. Die elektromagnetische Welle, die am Objekt 2 reflektiert, und dann im Gitter G gebeugt wird, weist eine Phasenverzögerung auf, die vom Abstand S abhängt, und jede gebeugte Komponente hat eine andere Phasenverzögerung bzw. -nacheilung. Infolgedessen ist die Phasenverzögerung oder -nacheilung vom Abstand S jeder der I_1 - und I_2 -Komponenten, die die gebeugte Welle D bilden, unterschiedlich, so daß sich die Schwebungsphase in Abhängigkeit des Abstands S ändert.

Wenn die Schwebungsphase mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens mit einer Genauigkeit in der Größenordnung von 1° gemessen wird, kann der Abstand S leicht mit einer Genauigkeit besser als $\lambda/100$ gemessen werden.

Bei dem zuvor beschriebenen Ausführungsbeispiel 6 kann zwischen die beiden Objekte ein optisches System, beispielsweise in Form von Linsen vorgesehen sein. Wie in Fig. 11 dargestellt ist, wird das Bild des Beugungsgitters G1 (mit einer Gitterkonstante d_1) auf dem Objekt 1 mittels des Linsensystems L1 und L2 auf das Beugungsgitter G2 (mit einer Gitterkonstante d_2) auf dem Objekt 2 fokussiert. Beispielsweise ist die Gitterkonstante d_1' des auf das Objekt 2 fokussierten Bilds des Beugungsgitters G1 so gewählt, daß $d_2/d_1' = 1,5$ ist. Die kombinierte Welle I, die auf den unterschiedliche Frequenz und Polarisationszustände aufweisenden Lichtstrahlen I_1 und I_2 besteht, fällt senkrecht auf die Oberfläche des Beugungsgitters G1 auf. Ein geeigneter Raumfilter 30 ist in der Brennebene des Linsensystems L1 angeordnet, so daß die Wellen, die in geeigneten Brechungsordnungen (beispielsweise der \pm ersten Brechungsordnung) gebrochen werden, nur durch das Filter 30 gelangen können und auf das Objekt 2 fokussiert werden.

Bei diesem System, das auf demselben Prinzip beruht, wie es im Zusammenhang mit dem Ausführungsbeispiel 6 beschrieben wurde, wird die Phasendifferenz zwischen den Schwebungen in den vom Beugungsgitter G2 gebeugten Wellen Da und Db in den Detektoren 4 und 5 gemessen, so daß die Relativverschiebung in Richtung der Oberflächen der Beugungsgitter auf den Objekten 1 und 2 (in der in Fig. 11 eingezeichneten X-Richtung) gemessen werden kann. Die Messung der Relativbewegung in der zuvor beschriebenen Weise kann ohne nachteilige Beeinflussung der Meßgenauigkeit sogar auch dann durchgeführt werden, wenn das Bild des Beugungsgitters G1 nicht scharf auf das Beugungsgitter G2 fokussiert ist, d. h. vor oder hinter dem Beugungsgitter G2 fokussiert ist. Auch wenn ein optisches Projektionssystem, beispielsweise ein konkaver Spiegel anstelle der Linsen verwendet wird, kann die Relativverschiebung in einer im wesentlichen gleichen Weise, wie dies zuvor beschrieben wurde, gemessen werden.

Das bereits beschriebene Ausführungsbeispiel 9 ist sehr vorteilhaft und wirkungsvoll mit hoher Genauigkeit eine Ausrichtung oder Anpassung zwischen einer Strichplatte oder Zielmarke und einem Halbleiterwafer in den Verkleinerungsprojektions-Belichtungsgeräten zu erreichen, die in großem Maße bei der Produktion von VLSI's (very large scale integration) benutzt wird. Auch wenn die Beugungsgitter G1 und G2 zueinander nicht parallel sind, kann das erfindungsgemäße Verfahren auf einfache Weise durch Verwendung geeigneter optischer Systeme eingesetzt werden. Wenn optische Fasern zur Festhaltung der Polarisationsrichtung in einem optischen Projektionssystem verwendet werden, wird es weiterhin möglich, die Beugungsgitter G1 und G2 in irgendeinem geeigneten Abstand voneinander beabstandet anzuordnen. Wie bereits erwähnt, kann man mit dem zuvor beschriebenen Ausführungsbeispiel die Relativverschiebung mit hoher Genauigkeit auch dann messen, wenn die Objekte in verschiedenster Weise angeordnet sind.

Wie zuvor im einzelnen beschrieben wurde, kann die vorliegende Erfindung bei verschiedensten Verfahren zur Messung von Relativversetzungen unter Ausnützung der Beugungseffekte von Wellen an Beugungsgittern eingesetzt werden und die Eigenschaften der Meßverfahren wesentlich verbessern. Die vorliegende Erfindung wurde bei den hier erläuterten Ausführungsbeispielen im Zusammenhang mit der Relativverschiebung oder -versetzung von zwei Objekten oder Gegenständen zueinander erläutert. Die erfindungsgemäßen Verfahren können jedoch in geeigneter Weise auch so eingesetzt werden, daß die Relativverschiebungen von drei oder mehr Gegenständen relativ zueinander leicht gemessen werden kann. Die vorliegende Erfindung hat daher weite industrielle Anwendungsmöglichkeiten auf Gebieten, bei denen die Messung von Relativversetzungen mit hoher Genauigkeit erforderlich ist. Insbesondere ist die vorliegende Erfindung sehr vorteilhaft für Messungen

von Relativversetzungen zwischen einer Belichtungsmaske und einem Halbleiterwafer in lithographischen Verfahren anwendbar, die breite Verwendung bei der Herstellung elektronischer Elemente Anwendung finden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Messung der Relativbewegung zweier Objekte, wobei folgendes vorgesehen ist:
jedes der Objekte trägt mindestens ein Beugungsgitter,
zwei Lichtwellen der Wellenlänge λ_1 bzw. λ_2 , die miteinander interferenzfähig sind,
jede der Lichtwellen wird an mindestens einem Beugungsgitter eines Objektes gebeugt,
mindestens eine gebeugte Lichtwelle der Wellenlänge λ_1 wird mit mindestens einer gebeugten Lichtwelle
der Wellenlänge λ_2 zur Interferenz gebracht, und
die relative Bewegung basierend auf der Phasendifferenz der Schwebungen wird gemessen,
wobei die Messung der Schwebungen in unterschiedlichen Beugungsordnungen erfolgt. 5
2. Verfahren zur Messung der Relativbewegung zweier Objekte, wobei folgendes vorgesehen ist:
mindestens eines der Objekte trägt ein Beugungsgitter, auf das eine Lichtwelle der Wellenlänge λ_1 fällt, die
an dem Beugungsgitter gebeugt wird, so daß mindestens zwei gebeugte Wellen entstehen,
eine zweite Lichtwelle der Wellenlänge λ_2 , die mit den mindestens zwei gebeugten Wellen interferenzfähig
ist, wird mit diesem zur Interferenz gebracht, und
die relative Bewegung basierend auf der Phasendifferenz der Schwebungen wird gemessen, wobei die
Messung der Schwebungen in unterschiedlichen Beugungsanordnungen erfolgt. 10
3. Verfahren zur Messung des Abstands zweier Objekte, wobei folgendes vorgesehen ist:
das eine der Objekte trägt ein transparentes Beugungsgitter,
das andere der Objekte ist an der dem Beugungsgitter zugewandten Seite reflektierend,
zwei Lichtquellen der Wellenlänge λ_1 bzw. λ_2 sind miteinander interferenzfähig und haben unterschiedliche
Polarisationsebenen, 15
- die beiden Lichtwellen werden an dem Beugungsgitter des einen Objekts gebeugt, und mindestens ein
Beugungsanteil der beiden Lichtwellen wird an der reflektierenden Seite des anderen Objekts reflektiert,
wobei die so entstandene Lichtwelle zur Interferenz gebracht wird mit der einmal am Beugungsgitter
gebeugten Lichtwelle, und
der Abstand basierend auf der Phase der durch die Interferenz entstehenden Schwebungen gemessen wird. 20
4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Wellen sich in den Polarisationszu-
ständen unterscheiden. 25
5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Wellen jeweils in unterschiedlichen Rich-
tungen linearpolarisiert sind.
6. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß zwei von drei Beugungsgittern auf
einem Gegenstand und eins von drei Beugungsgittern auf dem anderen Gegenstand ausgebildet sind. 30
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die drei Beugungsgitter symmetrisch angeord-
net sind.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2 oder 4 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß eine Gitterkon-
stante des auf einem Gegenstand ausgebildeten Beugungsgitters den $j/2i$ -fachen Wert des ausgebildeten
Beugungsgitters aufweist, wobei i und j positive ganze Zahlen sind. 35
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2 oder 4 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Gitterkon-
stante des auf einem Gegenstand ausgebildeten Beugungsgitters das 1,5-fache der Gitterkonstante des auf
dem anderen Gegenstand ausgebildeten Beugungsgitters ist. 40
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 oder 4 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Wellen in der
Weise durch einen polarisierten Strahlenteiler laufen, daß sie nach Durchgang durch eine Lambdaviertel-
Platte auf das Beugungsgitter auffallen, daß ein reflektierter Lichtstrahl durch eine Lambdaviertel-Platte
und einen Reflektionsspiegel wieder zu dem polarisierenden Strahlteiler läuft, und daß der am Beugungsgit-
ter gebeugte Lichtstrahl und der zum polarisierenden Strahlteiler zurückreflektierte Lichtstrahl kombiniert
und vom polarisierten Strahlteiler abgegeben werden, wobei die Phasendifferenz detektiert wird. 45
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß die erhaltene gebeugte
Welle durch einen Polarisator läuft, wobei die Phasen der Schwebungen des vom Polarisator abgegebenen
Lichtstrahls gemessen werden. 50
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen wenigstens zwei
benachbarten Gegenständen ein optisches System angeordnet ist. 55
13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß das optische System eine erste Linse, eine
zweite Linse und einen in der Brennebene der ersten Linse angeordneten Raumfilter umfaßt.
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Gegenstände zueinan-
der parallel angeordnet sind. 60

Hierzu 9 Seite(n) Zeichnungen

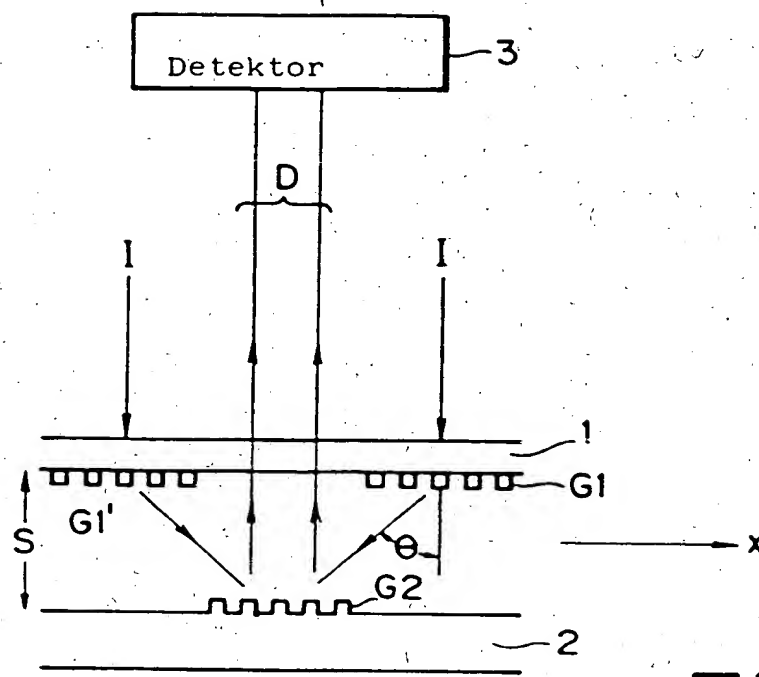


FIG. 2

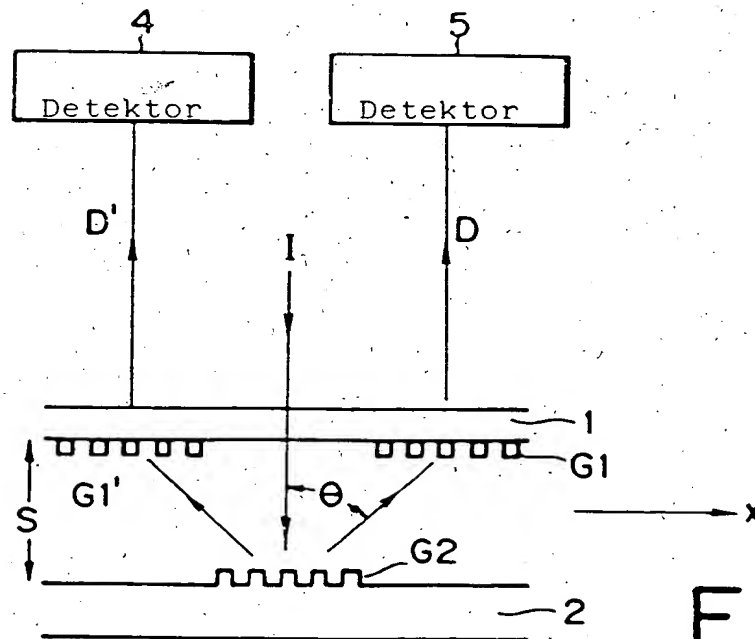


FIG. 3A

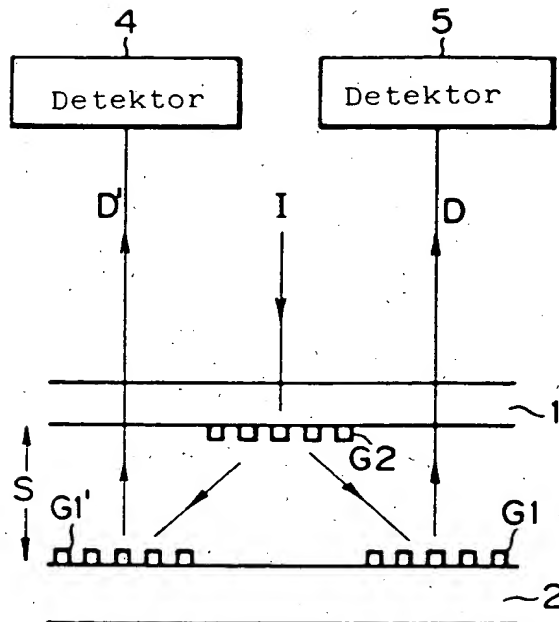


FIG. 3B

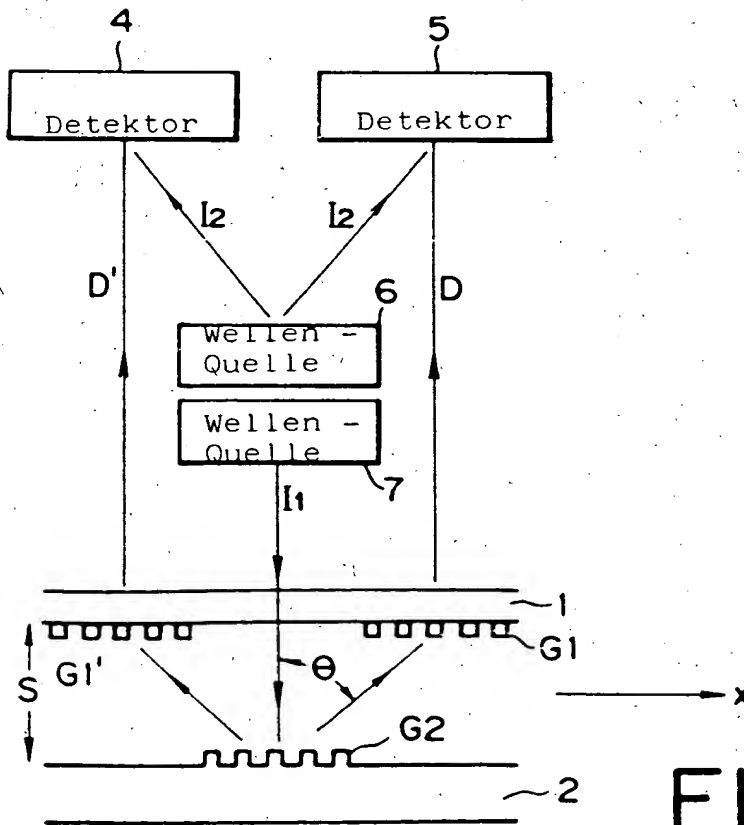


FIG. 4

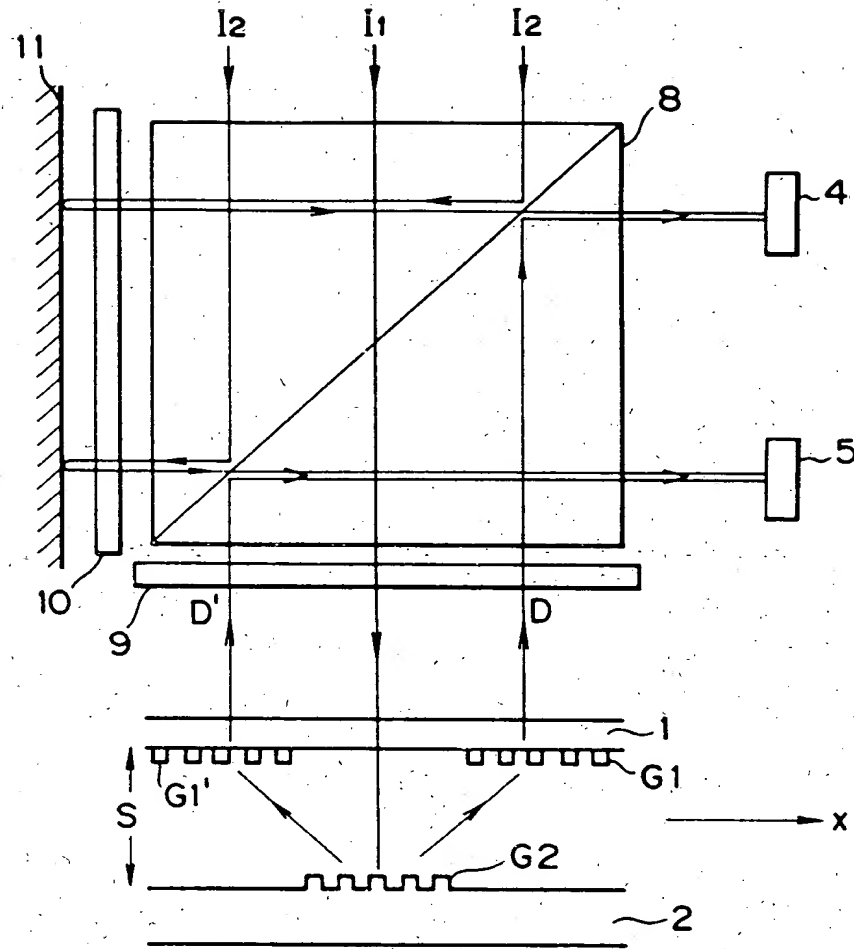


FIG. 5

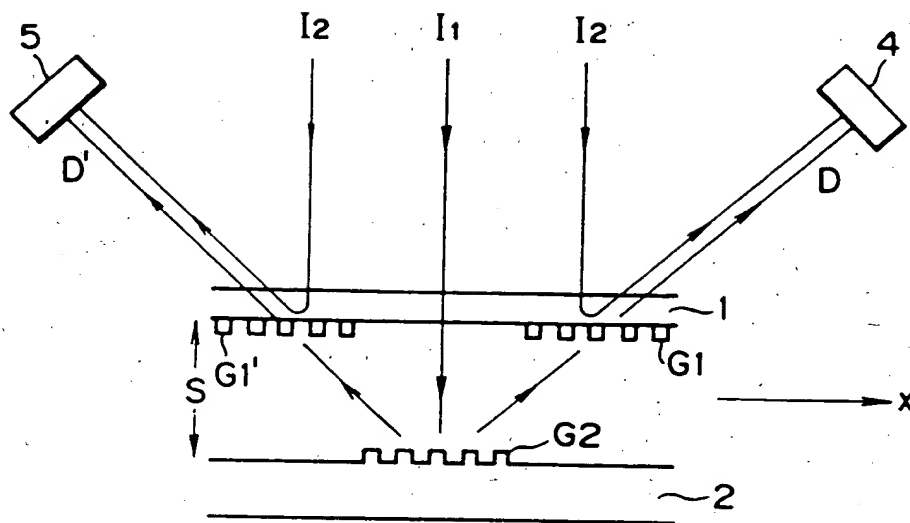


FIG. 6

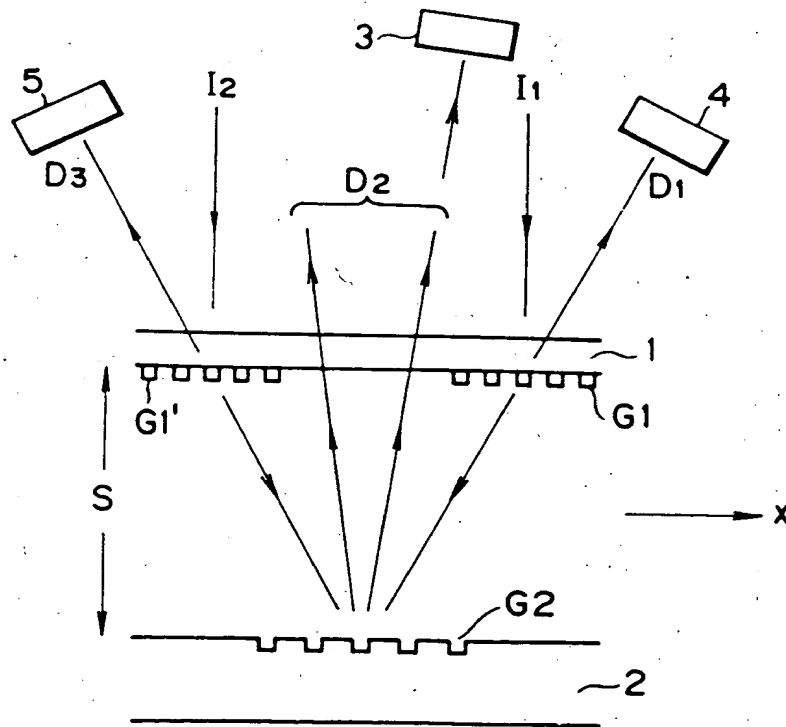


FIG. 7

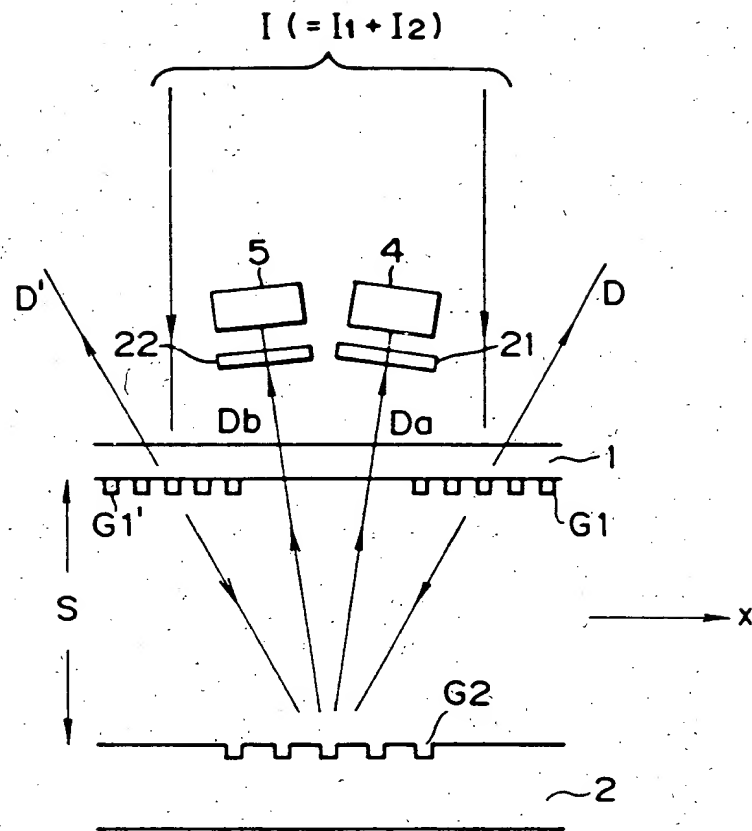


FIG. 8

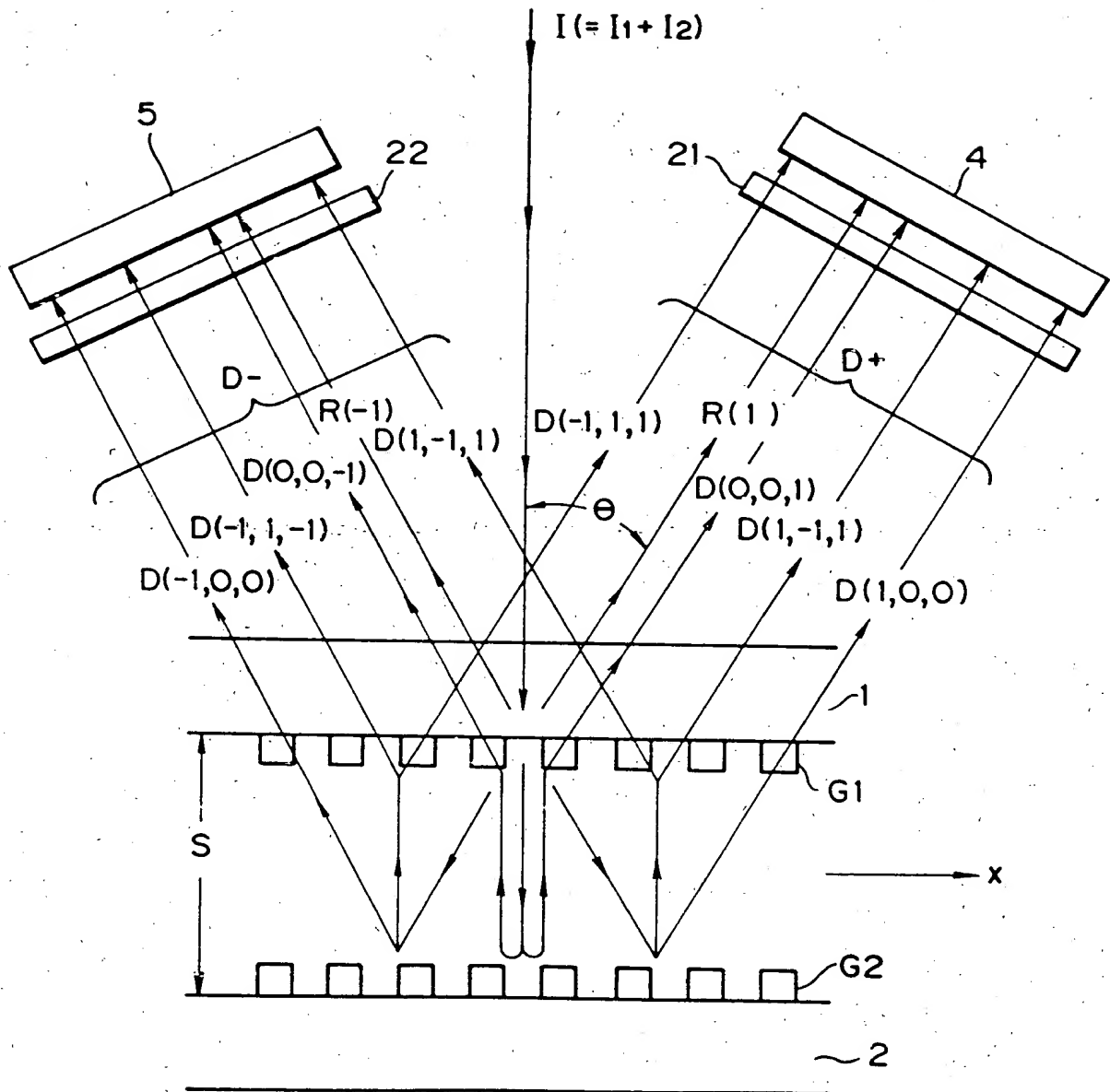


FIG. 9

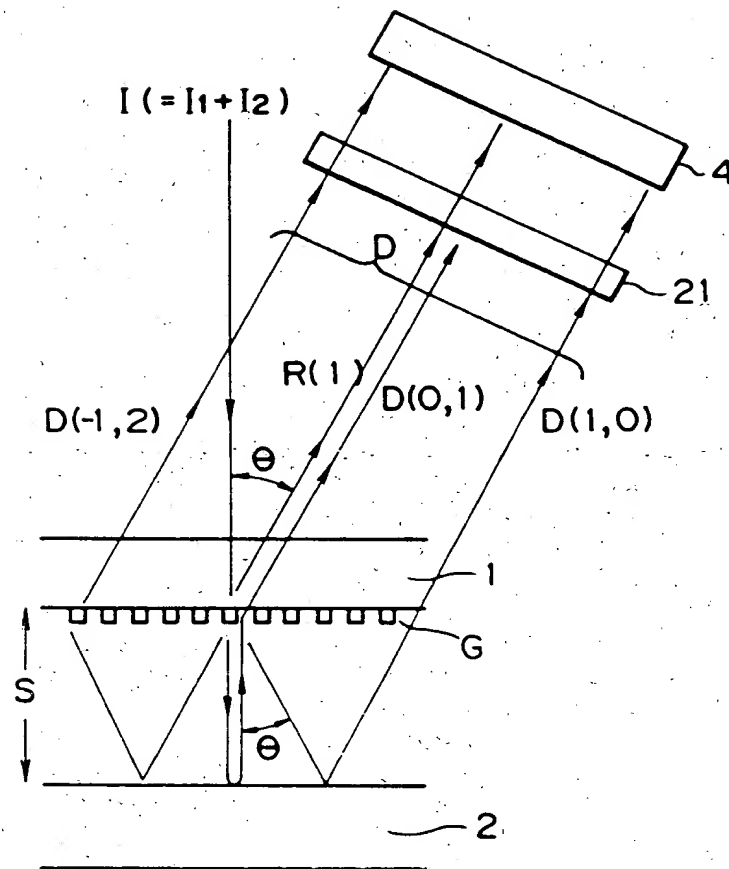


FIG. 10

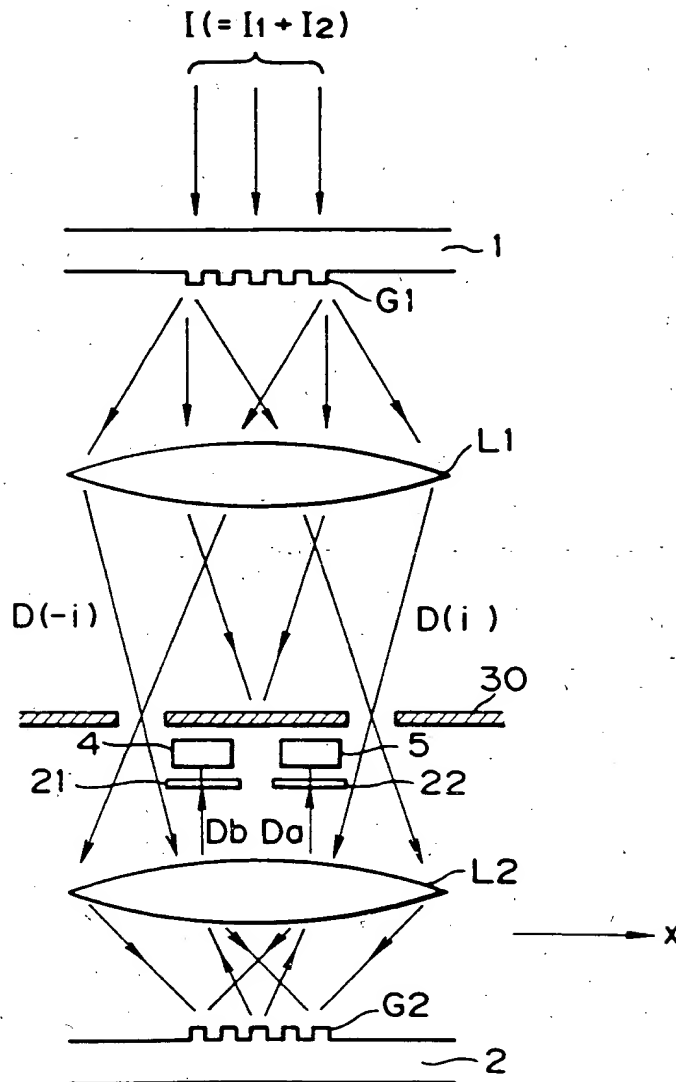


FIG. 11

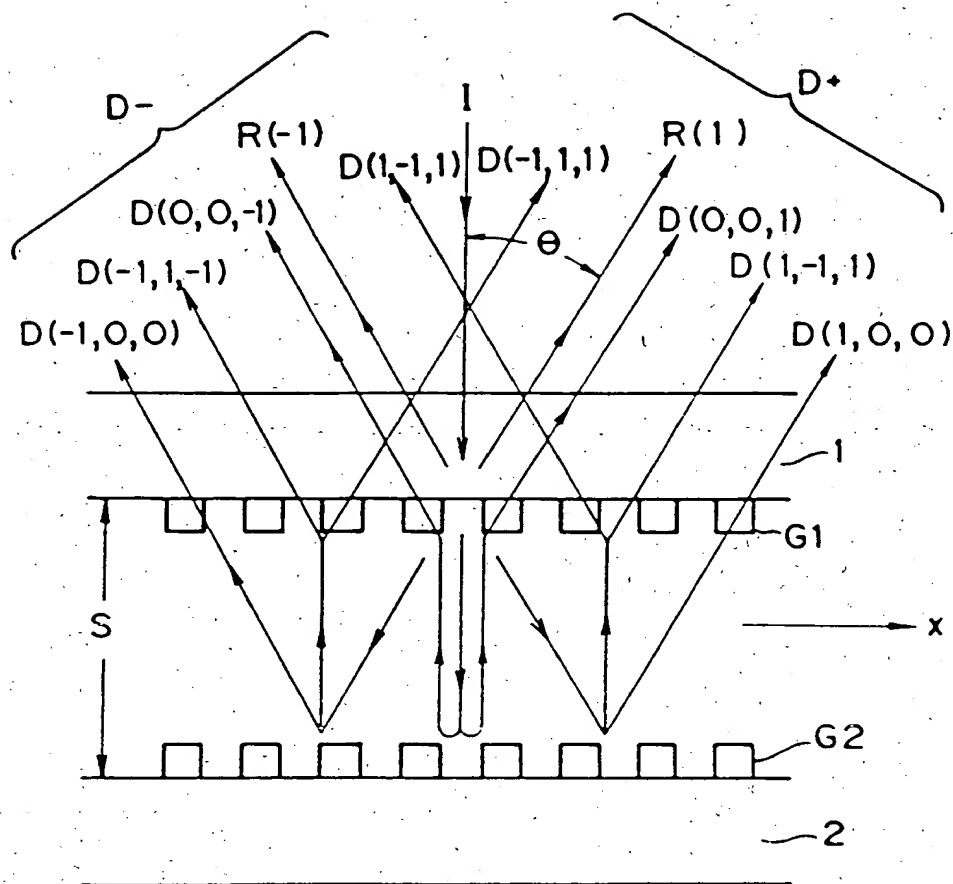


FIG. 1